



# 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION Academic

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

## Evaluación Geoespacial del Potencial de la Energía Eólica para un Proyecto Onshore en la Región del Caribe Colombiana

PABÓN HERNÁNDEZ S. M.

*Corporación Universitaria de la Costa, Barranquilla. Colombia*

### Abstract

Colombia is setting a national renewable energy target providing a clear indication of the level of renewable energy development and the timeline envisioned by 2020 with almost the 7% of the energy production excluding large hydropower plants shall be generated from renewable energies.

In Colombia the wind potential is outstanding, the Northern Caribbean region of the country alone has almost 20.000 MW of capacity (Huertas L., 2007) but the real wind energy potential of all Colombia's regions has to be defined, for this reason, this study is a useful start to generate research findings to uncover suitable sites for developing wind energy. This study provides a more precise and differentiated assessment for an onshore wind energy farm in the Northern Caribbean region of Colombia selecting study areas of three Colombian's departments (Atlantic, Magdalena and La Guajira).

Likewise, wind energy potential assessment integrates socio-political, environmental and techno-economic criterion in a geographic information system (GIS) combining with a multi criteria decision making (MCDM) with its analytical hierarchy process approach.

The purpose to find potential sites for build wind farms combining geographic information systems (GIS) and multi criteria decision making (MCDM) with the analytical hierarchy process (AHP) approach. Since onshore wind energy siting is inherently multifaceted, an approach capable of evaluating several criteria simultaneously must be used.

Geographic information system (GIS) have the ability to assimilate, analyse, and visualise multiple spatial data sets that pertain to the different factors used for site selection, but GIS is limited in its capacity to assign values to these factors. Thus, a multi-criteria decision-making (MCDM) must be generated since this approach has been shown to be an effective technique for assigning values to different criteria, and it is compatible with the functionality of GIS.

Generating three models, the restriction model, which will indicate the areas excluded to develop wind farms, the rated model performing an evaluation of the different criteria used to develop a wind farm.

The result of these models can be easily displayed on the web to provide free, quick access for those interested in onshore wind energy siting, and increasing access to this type of information has been shown to enhance public participation in the siting process,

Following the result of the suitability model, 3.1% of the total study area is characterized by very high suitability (value score 5), 37.73% by high suitability (value score 4), 2% medium suitability (value score 3), low suitability (value score 2), and the rest 55.24% is excluded area (value score 0). Based on these findings, there is sufficient space available for developing a wind farm in the north Caribbean region, especially in the selected study area.

This study can have an extraordinary impact on the public through the production of interactive web-based maps, promoting wind energy planners and renewable energies students to develop wind farms with different constraint and criteria.

**Keywords:** *Affordable and clean energy, climate action, onshore wind farm, wind potential, geographic information system (GIS), multiple criteria decisions, MCDM, analytical hierarchy process (AHP).*

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Barranquilla - Colombia - June 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> - 2018

## 1. Introducción

En un momento en que aumenta el precio de la electricidad, el índice poblacional y el cambio climático muestra sus primeros efectos, las energías renovables se están convirtiendo en el foco para ayudar a mitigar la alarmante consecuencia del deterioro al medio ambiente.

Las energías renovables, incluidas la energía solar, la bioenergía, energía hidroeléctrica así como la energía eólica se han expandido en todo el mundo, siembargo la energía eólica ha sido la energía de más rápido crecimiento a nivel mundial durante los últimos años, y los pronósticos predicen que esta tendencia continuará durante la próxima década y más allá.

En América Latina, el desarrollo de la energía eólica ha ganado ímpetu durante los últimos cuatro años. A lo largo del continente se pueden observar algunos parques eólicos, particularmente en países como México, Brasil, Chile, Costa Rica y Uruguay estos dos últimos países se han convertido en líderes en América Latina, con más del 80% de su producción de electricidad proviente de las energías renovables [2]. Colombia ha establecido un objetivo nacional de energía renovables que proporciona una indicación clara sobre el nivel de desarrollo de energía renovable y el cronograma previsto para 2020 con casi el 7% de la producción de energía, excluidas las grandes centrales hidroeléctricas, se generarán de energías renovables [3].

El potencial eólico de Colombia es sobresaliente especialmente en la región norte del país con casi 20,000 MW de capacidad [4]. Sin embargo, el potencial real para región caribe no se ha definido aún, por esta razón, es conveniente comenzar a generar investigaciones para identificar los lugares estratégicos con mayor potencial para generar energía eólica. De este modo es necesario generar herramientas que permitan una fácil visualización de el real potencial eólico en la región caribe Colombiana, el propósito de este artículo es dar a conocer la forma más eficaz de localizar sitios potenciales para construir parques eólicos combinando sistemas de información geográfica (SIG), la toma de decisiones de criterios múltiples (Multicriteria decision making, MCDM) con el enfoque de proceso el proceso de jerarquía analítica (analytical hierarchy process, AHP).

## 2. Metodología

Dado que la ubicación de un parque eólico en tierra (onshore) es intrínsecamente multifacética, se debe utilizar un enfoque capaz de evaluar varios criterios simultáneamente. El sistema de información geográfica (SIG) tiene la capacidad de asimilar, analizar y visualizar múltiples conjuntos de datos espaciales que pertenecen a los diferentes factores utilizados para la selección del lugar adecuado, pero SIG tiene una capacidad limitada para asignar valores a estos factores. Por lo tanto, debe generarse una toma de decisiones multicriterio (MCDM) ya que este enfoque ha demostrado ser una técnica efectiva para asignar valores a diferentes criterios, y es compatible con la funcionalidad de SIG.

Generando tres modelos, el modelo de restricción, que indicará las áreas excluidas para desarrollar parques eólicos, el modelo de evaluación el cual que realiza una clasificación de los diferentes criterios utilizados para desarrollar un parque eólico y el modelo de idoneidad proporcionará los mejores sitios adecuados para desarrollar un parque eólico, generando confiabilidad y efectividad para localizar sitios potenciales.

### 2.1 Toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM)

La toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM) se refiere principalmente a cómo combinar la información de varios criterios para formar un único índice de evaluación, así como MCDM, es un método exitoso para evaluar la importancia relativa de múltiples variables como criterios de entrada para hacer decisiones complejas [5].

El proceso de jerarquía analítica (AHP) es original descrito por el profesor Thomas L. Saaty en 1977 como un teorema general de medición; proporciona un medio para descomponer el problema en una jerarquía en subproblemas que puede ser fácilmente comprendidos y evaluados subjetivamente, la evaluación subjetiva se convierte en valores numéricos y se procesa para clasificar. Con base en la descripción de [7], [8] y [9], la metodología del AHP se puede explicar en cuatro pasos principales de la siguiente manera:

1. Estructurar la jerarquía: organizar en una jerarquía estructurada en términos de objetivo, criterios y alternativas, reflejando la relación entre los criterios de un nivel y los del nivel inmediatamente inferior. Cómo el objetivo es encontrar un sitio óptimo para construir un parque eólico, los seis criterios seleccionados están expuestos en la Tabla 4.

2. Realizar comparaciones pareadas entre criterios / subcriterios: construir una comparación matricial por pares de criterios / subcriterios aplicando la matriz de juicio, **Ec. (1)**, donde las entradas indican el predominio de un criterio / subcriterios por encima de otro. La escala aplicada para hacer esta comparación por pares se proporciona en la **Tabla 1**, las comparaciones en AHP permiten a los accionistas, partes interesadas y expertos hacer juicios cualitativos. El número de juicios requeridos para dicha matriz es  $n(n-1)/2$ , donde  $n$  es el número de criterios, la matriz  $A = [C_{ij}] \forall i, j = 1, 2, \dots, n$  puede construirse para los  $n$  criterios que afectan la selección de una de las alternativas disponibles.

La Ec.(1) de la matriz de juicio "A" se da a continuación, donde  $C_{ij}$  es la importancia relativa del criterio  $C_i$  sobre el criterio  $C_j$  [ $C_{ij} = 1/ C_{ji}$ ].

$$A = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{1(n-1)} & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & C_{2(n-1)} & C_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{n(n-1)} & C_{nn} \end{pmatrix} \quad Ec(1)$$

**Tabla 1.** Realizar comparaciones pareadas entre criterios, basado en [9].

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Moderada importancia de uno sobre otro	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra
5	Importancia esencial o sustancial	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Muy fuerte importancia	Una actividad se favorece muy fuertemente, y su dominio se demuestra en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del orden de afirmación más alto posible
2,4,6,8	Importancia intermedia	Cuando se necesita compromiso

3. Cálculo del vector de prioridad: para generar la importancia de los diferentes criterios es necesario calcular el vector de prioridad aplicando la **Ec. (2)**, el vector de prioridad indica la importancia de cada criterio donde  $w$  es el vector propio principal de la matriz  $A$ . Además de  $\lambda_{\max}$  es el valor propio máximo de la matriz de juicio.

$$A \times w = \lambda_{\max} \times w \quad Ec(2)$$

4. La consistencia de la matriz  $A$ : con la propuesta de verificar la consistencia de la matriz  $A$ , se deben evaluar dos parámetros: el Índice de consistencia (IC) y el Consistencia del radio (CR).

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad Ec(3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad Ec(4)$$

**Tabla. 2.** Valores de índice aleatorios, basado en [9].

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>RI</i>	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

El índice de consistencia se evalúa con la **Ec.(3)**, donde  $\lambda_{max}$  es el valor propio máximo de la matriz de juicio, *n* es el número de criterios; Asimismo, la relación de consistencia se evalúa aplicando la **Ec.(4)**;

Donde *RI* es el índice aleatorio (*RI*), *RI* se obtiene de la **Tabla 2**, se usa para calcular la *RC* y generalmente varía de acuerdo con el tamaño de la matriz, en este caso se han seleccionado una matriz de 6x6 con seis criterios seleccionados (ver Tabla 3) significa que el *RI* es 1.24, la escala de evaluación pairwise se da en la **Tabla.2**, La evaluación de la matriz de consistencia se basa en el resultado de *CR*, si *CR* es menor que 0.1, la matriz A se considera consistente, sin embargo, si *CR* excede el umbral, la matriz A se consideraría como inconsistente.

### 3. Area de estudio

Tres departamentos colombianos (La Guajira, Magdalena y Atlántico) forman parte del "Área de estudio" seleccionada en la que se evalúa el potencial eólico, así como diferentes características para desarrollar un parque eólico, con un área total proyectada de 38.835 km<sup>2</sup> y 68 municipios [10], la descripción espacial del área de estudio se muestra en la **Fig.1**.

El departamento de La Guajira, ubicado en el extremo norte de Sudamérica, comparte fronteras con el Mar Caribe y Venezuela, con un área proyectada de 17.408 km<sup>2</sup>, 985.498 habitantes y 15 municipios [10] es una de las regiones menos densas de Colombia, bien conocido por su extraordinario potencial eólico y su riqueza natural y cultural. Así mismo, en La Guajira se ubica el primer parque eólico en Colombia, "El Jepirachi", un parque eólico con una capacidad de producción de 19.9 MW [11].

**Fig.1.** Descripción del área de estudio y ubicación espacial, mapa del autor basado en datos de [10].

El departamento de Magdalena con un área proyectada de 17.408 km<sup>2</sup>, 1.272.278 habitantes y 30 municipios, está ubicado en el noreste y comparte fronteras fluviales con el departamento de Guajira y el departamento de Cesar. El Magdalena posee especiales características naturales y geográficas, tales como varios recursos hídricos, parques naturales y dos de las montañas más altas del país: El Pico Cristobal Colón es el pico más alto de Colombia que se encuentra a una altura de 5.776 metros; El Pico Simón Bolívar sigue de cerca el pico a una altitud de 5.638 metros [12] que están ubicados en el Parque Natural "La Sierra Nevada de Santa Marta".

Finalmente, el departamento de Atlántico se ubica al norte del país, comparte fronteras con el departamento de Magdalena y el departamento de Bolívar, con 2.489.709 habitantes, superficie total de 3.649 km<sup>2</sup> y 23 municipios. El Atlántico es considerado por los departamentos más densos de Colombia, el departamento posee una posición geográfica estratégica, rodeado por el río Magdalena y el Océano Atlántico (Mar Caribe), lo que hace que el departamento sea muy atractivo en cuanto a logística y cadena de suministro.

### 3.1 Selección de criterios

Se eligió un conjunto de ocho criterios para generar un modelo de idoneidad de la energía eólica, la selección de criterios es producto de una extensa revisión de la literatura. Los datos son proyectados a un sistema de coordenadas geográficas: GCS\_WGS\_1984 convertido en un dato ráster y remuestreado a una celda común de (22 m).

Adicionalmente algunos de los criterios seleccionados fueron encontrados en archivo original PDF y archivos tipo vector, sin embargo para hacer un modelo de idoneidad es necesario que todos los criterios se encuentren en el mismo formato, es por esto que todos deben tener una extensión raster. Los modelos raster son útiles para almacenar datos que varían continuamente, como en una fotografía aérea, una imágenes satelitales, concentraciones químicas o pendientes (superficie inclinada) [13].

**1. Velocidad del viento:** La velocidad del viento es casi siempre una consideración clave, cuanto mejor es el recurso, mayor es la producción potencial de energía y los ingresos del proyecto [20], el criterio de velocidad promedio del viento es ampliamente utilizado en todos los estudios encontrados y es considerado uno de los criterios más importantes .

La velocidad del viento a 90 m fue obtenido através del IDEAM, en el 2012 esta institución diseño el Atlas eólico interactivo en el que se explican las diferentes características del potencial eólico en Colombia, en este atlas están incluidos la velocidad, densidad, rugosidad, dirección del viento, entre otros recursos. Los datos del atlas eólico se basan en 111 estaciones de medición meteorológica, 10 de ellas están ubicadas en el área de estudio relacionada, las mediciones son de un período de 29 años, entre 1961 y 1990 [21].

**2. Uso del suelo:** Una de las principales ventajas de la energía eólica, en comparación con la mayoría de las otras formas de desarrollo energético, es que los usos de la tierra preexistentes, como los cultivos y el pastoreo, pueden combinarse sin problemas. Las turbinas eólicas deberían instalarse en la tierra con la menor alteración de la tierra existente [22]. El mapa de uso de la tierra también llamado por el uso de la tierra del IGAC, el área de estudio presenta diferentes tipos de uso del suelo, como pastizales, tierras de cultivo, agroforestería, bosques y reservas, ya que el objetivo es encontrar el el sitio más adecuado para construir un parque eólico, las categorías bosque y reservas naturales son tomados como exclusión.

**3. Distancia de área urbana:** Algunos parámetros deben ser evaluados antes de construir en un parque eólico cerca de áreas urbanas como es el caso de propagación de sonido, sombras y reflejos, impacto visual en el paisaje y aceptación pública [15], estos parámetros implican una revisión exhaustiva de estándares, leyes y regulaciones de el sitio de evaluación específico. Según la resolución existente en Colombia, el nivel máximo de presión sonora permitido durante el día es de 65 dB y 45 dB por la noche [23]. Los límites de ruido en Colombia son similares a los utilizados en Europa. El impacto del ruido y la rotación de las turbinas de viento puede ser molesto para los vecinos si las turbinas están instaladas demasiado cerca o en la dirección opuesta a las viviendas o casas de vacaciones [5].

En el modelo de idoneidad propuesto, las áreas más cercanas a 550 m de las áreas residenciales se consideran excluidas. Este criterio proporcionan una visualización del núcleo poblacional del área de estudio. La mayoría de las grandes ciudades se encuentran en el departamento Atlántico, a diferencia del departamento de Guajira que representa una gran superficie, pero con un área urbana muy

reducida, este departamento posee una de los desiertos más grandes de Colombia y su población se centra en dos pequeñas ciudades. Las distancias desde áreas urbanas se encontraron como archivo vectorial llamado "Centro de población" y se derivaron del DANE.

**4.Red de transmisión eléctrica:** Aunque los proyectos eólicos varían en escala, los mismos componentes generales comprenden cualquier proyecto de tamaño, el proyecto típico de energía eólica moderna consta de tres sistemas principales: turbinas eólicas montadas en torres, un sistema de recolección eléctrica y facilidades de transmisión / interconexión, la mayoría de los proyectos también incluyen acceso carreteras, instalaciones de O & M y torres meteorológicas [15].

Las turbinas eólicas están conectadas a tres redes eléctricas: transmisiones, distribución y directamente al punto de entrega, la distinción entre las tres se basa en la tensión de línea, la capacidad de transporte de corriente depende del tamaño del conductor [24]. La estructura del sistema de energía en Colombia consiste en una red de transmisión nacional con un nivel de voltaje entre 500 y 220 kV, esta red de transmisión de alto voltaje se utiliza para transportar grandes cantidades de energía a largas distancias.

El siguiente nivel es la red de transmisión regional con una tensión de 110 kV, que transmite energía a la red de distribución local. La distancia de criterio de la red eléctrica se obtuvo de UPEM, el mapa denominado "sistema nacional de transmisión real de 2016", muestra el tipo de distribución de red eléctrica del país.

**5.Acceso y caminos existentes:** Con el fin de reducir el costo de construcción de las nuevas carreteras de acceso y evitar el sellado del suelo, las turbinas eólicas deben ubicarse lo más cerca posible de la red vial existente; las carreteras deben tener un ancho mínimo de 4 m y un pavimento de tierra [25].

La distancia criterio de la red de carreteras se derivó del DANE, en formato vectorial, el tipo original fue la polilínea en este criterio se incluyen todas las carreteras de Colombia. Esta fuente de datos no está dividida en categorías para el tipo de carretera, por lo tanto, es necesario verificar la información en herramientas abiertas como Google Maps.

**6.Ecosistemas naturales e hídricos:** Los potenciales impactos negativos de la energía eólica pueden resumirse en la interacción aviar / murciélago con aerogeneradores, el impacto visual de las turbinas eólicas, el ruido de la turbina eólica, los efectos de interferencia electromagnética de las turbinas eólicas y el impacto de los sistemas de energía eólica en el uso de la tierra [14].

Asimismo, la presencia de parques eólicos puede afectar la vida de las aves de las siguientes maneras: colisión, turbulencia debida al desplazamiento, efecto barrera y cambio y pérdida del hábitat [18]. La distancia de criterios de los entornos naturales comprende los parques naturales regionales, las reservas de aves, las reservas naturales y civiles y los recursos hidrográficos.

**7.Datos digitales de elevación y pendiente :** En la industria eólica se distingue entre la rugosidad del terreno, la influencia de los obstáculos y la influencia del contorno del terreno, cuanto más pronunciada es la rugosidad de la superficie de la tierra, más se frena el viento [24].

Las pendientes pronunciadas de una superficie pueden reducir el acceso de grúas y camiones y aumentar el costo de construcción, las recomendaciones específicas para la restricción máxima de talud son muy complicadas de encontrar; en la revisión de la literatura, dos estudios aplicaron una limitación para pendiente superior al 30% [26] y [6]. Pendientes mayor o igual al 30% están excluidos. Con el fin de generar la característica de pendiente, es necesario crear el modelo de elevación digital (DEM). Por lo tanto, se seleccionaron las curvas de nivel derivadas del SIAC.

**Tabla.3.** Criterios y fuentes de datos utilizados para modelar la idoneidad de parques eólicos.

Criterio	Fuente de archivo	Razón para la selección	Archivo original	Tipo de archivo final
Velocidad del viento	IDEAM, velocidad del viento a 90 m.	Una estimación del recurso eólico en sitios potenciales de proyectos es el corazón del proceso de ubicación[14].	PDF	Raster
Uso del suelo	IGAC, Mapa del uso del suelo.	El acceso a la tierra es necesario para instalar y operar turbinas eólicas[15].	PDF	Raster
Distancia del área urbana	DANE, Centro poblacional.	Preocupaciones públicas sobre los impactos visuales y acústicos[16].	Vector, Polígono	Raster
Red de transmisión eléctrica	UPEM, Mapa de líneas de transmisión.	Reduciendo el costo de construir nuevas líneas de transmisión [17].	Vector, Polylinea	Raster
Acceso y caminos existentes	DANE, Acceso, caminos.	El camino de acceso debe ser capaz de soportar camiones pesados con remolques y grúas móviles pesadas[15].	Vector, Polilínea	Raster
Ecosistemas naturales	SIAC, Reserva de aves, parques naturales y ciénagas.	El impacto del parque eólico, incluida su construcción, en la flora y fauna local, debe ser considerado[18].	Vector, Polígono	Raster
Recurso hídrico	SIAC, Ríos.	Dependiendo del sitio, puede ser necesario evaluar el impacto del proyecto al recurso hídrico y suministros [18].	Vector, Polilínea	Raster
Datos digitales de elevación y pendiente	SIAC, Líneas de contorno.	Evite las áreas de una pendiente pronunciada. El viento en pendientes pronunciadas tiende a ser turbulento y tiene un componente vertical que puede afectar la turbina [19].	Vector, Polilínea	Raster

### 3.2 Áreas excluidas

Seguidamente es necesario determinar el área restringida también llamada áreas de exclusión, estas áreas están determinadas de acuerdo con la regulación legal, los estándares de evaluación del viento y la revisión de la literatura. La Tabla 4 expone los diferentes parámetros de exclusión correspondientes a cada criterio seleccionado.

En el caso del potencial de energía eólica, se excluyen todos los valores inferiores a 5 m / s, por lo que se excluyen los parámetros del entorno natural (bosque, parque natural regional, reserva civil y reserva de aves). En el caso de los criterios de pendiente, la exclusión se definió de la siguiente manera: "todos los terrenos con una pendiente superior al 30% están excluidos", así como la tierra utilizada (agroforestería, reserva y bosque), en casos particulares, cómo el centro urbano y los ríos, se crean zonas "Buffer", es decir, la distancia mínima alrededor de cada parámetro.

### 3.3 Modelo de restricción

El objetivo del modelo de restricción es generar una evaluación de aproximación del área de exclusión del área de estudio siguiendo los parámetros de exclusión: Velocidad del viento con un parámetro de exclusión < 5 m/s, Distancia de área urbana con un buffer de 550 m al rededor, caminos y líneas de transmisión con un buffer de 100 m alrededor, de los recursos naturales son excluidos bosques, parques naturales y reservas, así como pendientes con una inclinación  $\geq 30\%$  fueron excluidas y finalmente fueron excluidas según el uso y tipo de suelo todo lo relacionado a agroforestería, bosques y reservas.

A través de ArcMap, se crea el modelo de restricción, con el soporte de este software y diferentes herramientas espaciales, como BUFFER para generar la distancia mínima desde áreas urbanas, líneas de transmisión y carreteras. El área de evaluación en la Fig.4 (a). Demostró que el área excluida con casi 21.455 km<sup>2</sup> (55.24%) es notablemente mayor que el área potencial de 17.38 km<sup>2</sup> (44.75%) debido a limitaciones ambientales y técnicas, la región generó un desafío económico para desarrollar viento granjas debido al acceso a la red de baja potencia.

### 3.4 Modelo de evaluación del potencial

El modelo de evaluación del potencial se realiza, creando un modelo de potencial nominal, esta evaluación considera que los seis de los ocho criterios definidos: Velocidad del viento, uso del suelo,

distancia del área urbana, red de transmisión eléctrica, acceso y caminos existentes, ecosistemas naturales.

**Tabla. 4.** *Criterios y puntaje del valor.*

Puntuación	Área de potencial nominal	Velocidad del viento	Uso del suelo	Distancia de ecosistemas naturales	Distancia del área urbana	Distancia a la red de transmisión	Distancia a caminos existentes
		[m/s]	[tipo]	[m]	[m]	[m]	[m]
0	Excluido	<5.00	Reserva	0-100	0-550	0-100	-
1	Bajo	-	Bosque	100-184	550-650	>1,515	>2,281
2	Bajo	5-6	-	184-413	550-650	610-1,515	882-2,281
3	Medio	6-7	Agroforestería	413-658	650-1,0044	308-610	454-882
4	Alto	7-8	Tierras de cultivo	658-984	1,0044-2,5208	154-308	178-454
5	Muy alto	>8	Pastoreo	>984	>2,5208	0-154	0-178

Después de que la evaluación del desempeño de los diferentes criterios en el área de estudio es fácil de visualizar, la Tabla 4 describe los puntajes de Valores del modelo de potencial calificado que se dividen en seis categorías desde excluyente (puntaje de valor de 0) a muy alto (puntaje de valor de 5).

Cuando la categoría es muy alta para todos estos sitios con una energía eólica superior a 8 m / s, un tipo de pastizal, estos sitios están bastante lejos del entorno natural y las áreas urbanas; estos sitios adecuados están cerca de la red eléctrica y las carreteras. Además, la **Fig. 4 (b)**. Muestra el resultado del área de potencial nominal; puede ser claro, observe que el "Parque eólico Jepirachi" en La Guajira se ubica en un área estimada clasificada como mediana.

### 3.5 AHP evaluación

El último paso del estudio de idoneidad proporciona una visión general del proceso para la selección de los sitios de parques eólicos óptimos en una estructura jerárquica. Donde, la selección óptima del sitio eólico se considera el objetivo, por ejemplo, está en el nivel superior, los criterios que influyen en el logro del objetivo están en el segundo nivel (criterios), y el nivel inferior de la estructura es los sitios potencialmente adecuados como alternativas. Los resultados de importancia relativa son bastante similares con la información encontrada en la revisión de la literatura, el potencial de energía eólica es un criterio esencial con una importancia relativa de 30.1%, uso del suelo 22,6%, la distancia de la red eléctrica y el uso de la tierra con 15.7 y 16.9% respectivamente, los criterios de menor importancia

relativa en este estudio son la distancia de la red vial ó acceso y la distancia de las áreas urbanas con 8.7% y 6.7% respectivamente. El índice de idoneidad correspondiente a la evaluación del área de estudio, con una puntuación de valor entre 0 y 5, donde cero representa las áreas excluidas y cinco áreas con potencial de idoneidad muy alto, los valores del 1 al 4 representan desde bajo índice(1) hasta alto (4).

### 3.6 Modelo de idoneidad

El modelo de idoneidad es la combinación del modelo de restricción y el modelo de evaluación potencial; este modelo se crea con el fin de encontrar los sitios óptimos para desarrollar un parque eólico en el área de estudio, en ArcMap con la herramienta TIMES, el modelo de exclusión y el modelo de evaluación potencial se combinan como resultado de la combinación del modelo de idoneidad creado.

Para obtener el área potencial de energía eólica adecuada para cada departamento del área de estudio, se utiliza la herramienta Zonal Geometric As Table (Spatial Analysis), la herramienta Zonal calcula para cada zona (índice de idoneidad) en un conjunto de datos que la geometría mide como área, perímetro, espesor o las características de la elipse, después del rendimiento del cálculo la herramienta informa los resultados como una tabla como la Tabla 8.



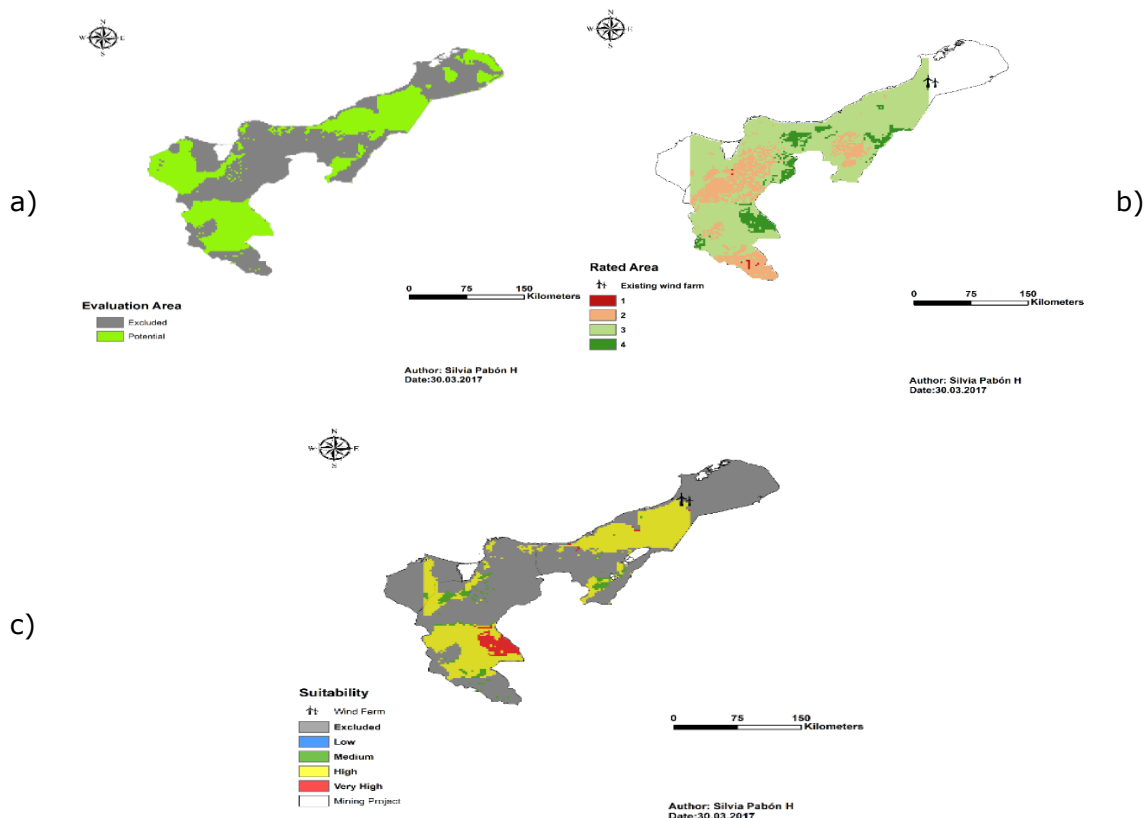
Los resultados del modelo de idoneidad se dividen en cinco categorías (índice de idoneidad), desde excluido hasta muy alto. **Fig.4(c)**. Ilustra la idoneidad de la energía eólica en el área de estudio.

**Tabla. 6.** Índice de idoneidad según el departamento de áreas de estudio.

Valor	Índice de idoneidad	La Guajira [km <sup>2</sup> ]	El Magdalena [km <sup>2</sup> ]	Atlántico [km <sup>2</sup> ]
0	Excluido	8.7302	10.3	2.043
1-2	Bajo	-	0.000484	-
3	Medio	2.952	0.07115	0.046
4	High	5.677	5.1062	1.56
5	Very high	0.0484	1.9301	-

Los resultados del modelo de idoneidad determinan que casi el 55.24% del área de estudio está excluida, el 1% del área de estudio tiene una baja idoneidad para desarrollar parques eólicos, el 2% tiene una categoría de idoneidad media, y el 37.73% del estudio son de una alta idoneidad, y el 3,1% del estudio tiene una idoneidad muy alta.

Significa que casi el 43.83% del área de estudio es apta para energía eólica terrestre. Además, como se expone en la **Fig.4.(c)**, se puede claramente observar que el parque eólico "Jepirachi", en La Guajira, está ubicado en este modelo en un área estimada clasifica como alta. Aunque para un inversionista potencial o accionista es muy impresionante que el 55.7% del área de estudio esté excluida, este porcentaje se debe a dos restricciones principales, primeras deficiencias de factores técnicos (distancia de la red eléctrica) y segundo la presencia sobresaliente del entorno natural en el área de estudio, que incluye parques naturales, reserva de aves y recursos hidrográficos.



**Fig.2.** Mapas resultantes de acuerdo al modelo aplicado: a) Modelo de restricción, b) Modelo de evaluación del potencial y c) Modelo de idoneidad para construir un proyecto eólico en la región Caribe Colombiana.

#### 4 Discusion

El marco desarrollado en este estudio se identificó con éxito áreas aptas para el desarrollo de la energía eólica a partir de un análisis exhaustivo de un conjunto de ocho criterios y la aplicación de una toma de decisiones multicriterio combinada con un enfoque de jerarquía analítica. Los resultados basados en el modelo de idoneidad revelan que la mayoría de las áreas con alta idoneidad se ubican en el departamento de La Guajira. Asimismo, con el resultado del modelo de idoneidad, la ubicación del parque eólico "Jepirachi" en el departamento de La Guajira se solapó por completo con las áreas identificadas como adecuadas que confirman la solidez de los resultados obtenidos.

#### 4.1 Resultados

El departamento de La Guajira tiene 8.678 km<sup>2</sup> de área de idoneidad para energía eólica de un total de 17.408 km<sup>2</sup>, lo que lo convierte en el 49,85% del territorio del departamento. Del área total, el 50.15% fue excluido debido a que el departamento tiene un bajo acceso a la red eléctrica nacional así como a su reserva natural sobresaliente, la cual debe estar protegida.

El departamento de Magdalena, por otro lado, posee 7.108 km<sup>2</sup>, 40.8% del área de idoneidad de un total de 17.408 km<sup>2</sup>. Casi el 59.2% del territorio total está excluido del área de estudio, lo que hace que el departamento con el área excluida más grande sea proporcional. Esta área excluida representa 10.3 km<sup>2</sup> del territorio del departamento y se debe a la baja velocidad del viento (<5 m / s) en la parte sur del departamento. Se estima que un área de 1.569 km<sup>2</sup> (42%) del total de 3.649 km<sup>2</sup> en el departamento de Atlántico es apta para el desarrollo de la energía eólica. Aunque el departamento de Atlántico es uno de los departamentos más densos de la población en Colombia, tiene una excelente aptitud para la energía eólica terrestre. Curiosamente, el potencial de energía eólica del departamento de Atlántico aumenta significativamente si se considera la evaluación de proyectos eólicos marinos (offshore) debido a la posición estratégica del departamento, los alrededores del río Magdalena y el mar Caribe.

En total, 3.1% del área total de estudio se caracteriza por alta idoneidad (puntaje de valor 5), 37.73% por alta idoneidad (puntaje de valor 4), 2% idoneidad media (puntaje de valor 3), baja idoneidad (puntaje de valor 2), y el resto 55.24% es área excluida (puntaje de valor 0). Con base a estos hallazgos, hay suficiente espacio disponible para desarrollar un parque eólico en la región del norte del Caribe, especialmente en el área de estudio seleccionada.

El resultado del modelo de restricción generó un porcentaje significativo de áreas excluidas debido a tres razones sólidas: El área de estudio posee recursos naturales notables, que incluyen reservas naturales y de aves, parques regionales y naturales. Todo esto hace que las tareas logísticas, especialmente el transporte de componentes de la turbina eólica, sean difíciles ya que la fabricación de nuevas carreteras no es una opción en dichas áreas. Alrededor del 98% de Colombia tiene acceso a la electricidad. Sin embargo, hay zonas en el país que aún no tienen acceso a la electricidad, muy particularmente en el caso del departamento de La Guajira, donde prevalece la velocidad del viento entre 10-15 m / s a 10 m sobre el suelo. Sin embargo, recientemente la Unidad de la Comisión Nacional de Energía de Minería y Planificación (UPEM) estableció en 2016 un plan de expansión de la red eléctrica, que incluye el departamento de La Guajira, el objetivo del plan de expansión es aumentar el acceso de electricidad del departamento hasta 70 % [27].

Finalmente la Proximidad a las áreas urbanas, Áreas que están muy alejadas de la cuenta pública para una proporción significativa de la gran área excluida. Sin embargo, esta restricción ayuda a crear un gran apoyo público para proyectos de parques eólicos dentro de las ubicaciones propuestas.

#### 5. References

- [1] GWEC, "Global Wind Report | Annual Market update 2015: Opening up new markets for bussiness," 2016.
- [2] IRENA, "Renewable Energy Statistics 2016: Latin America and the Caribbean: International Renewable Energy Agency," 2016.
- [3] REN21, "Renewables 2016:Global Status Report," 2016.

- [4] P. A. Huertas L., *Predicción de rendimiento de parques eólicos como herramienta de evaluación.*, Universidad de los Andes., 2007.
- [5] Y. Chen, J. Yu, and S. Khan, "Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation," *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, no. 12, pp. 1582–1591, 2010.
- [6] L. Tegou, H. Polatidis, and A. Haralambopoulos, "Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study," *Journal of Environmental Management*, no. 91, pp. 2134–2147, 2010.
- [7] T. L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, no. 3, pp. 234–281, 1977.
- [8] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process—What it is and how it is used," *Mathematical Modelling*, vol. 9, no. 3, pp. 161–176, 1987.
- [9] T. L. Saaty, "How to make a decision: The analytic hierarchy process," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no. 1, pp. 9–26, 1990.
- [10] Dane, "Population Projection," 4/24/2017, <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.
- [11] G. C. Ledec, K. W. Rapp, and R. G. Aiello, *Greening the Wind:: Environmental and social considerations for wind power development*, The World Bank, 2011.
- [12] B. Sawe, "Tallest Mountains In Colombia," <http://www.worldatlas.com/articles/tallest-mountains-in-colombia.html>.
- [13] J. McCoy and K. Johnston, *Using ArcGis Spatial Analyst: GIS by ESRI*, ESRI, United States of America, 2010.
- [14] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley, Chichester, 2009.
- [15] T. Wizelius, *Developing wind power projects: Theory and practice*, Earthscan, London u.a., 2007.
- [16] L. C. Rodman and R. K. Meentemeyer, "A geographic analysis of wind turbine placement in Northern California," *Energy Policy*, vol. 34, no. 15, pp. 2137–2149, 2006.
- [17] S. Baban and T. Parry, "Developing and applying a GIS-assisted approach to Locating wind farms in the UK," *Renewable Energy*, *Renewable Energy* 24 (2001) 59–71.
- [18] T. Burton, *Wind Energy Handbook*, Wiley, Chichester, 2011.
- [19] A. F. Zobaa and R. C. Bansal, *Handbook of renewable energy technology*, World Scientific, Hackensack, NJ, 2011.
- [20] M. C. Brower, *Wind Resource Assessment: A practical guide to developing a wind project*, Wiley, Hoboken u.a., 2012.
- [21] IDEAM, "Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia," IDEAM, <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.
- [22] A. Miller and R. Li, "A Geospatial Approach for Prioritizing Wind Farm Development in Northeast Nebraska, USA," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 3, no. 3, pp. 968–979, 2014.
- [23] Ministry of Health, "Resolution 8321," <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=6305>.
- [24] P. Jain, *Wind energy engineering*, McGraw-Hill, New York, NY u.a., 2011.
- [25] R. van Haaren and V. Fthenakis, "GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State," 2011.
- [26] T. Höfer, Y. Sunak, R. Madlener et al., "Wind Farm Siting Using a Spatial Analytic Hierarchy Process Approach: A Case Study of the Städteregion Aachen," *E.O.N Energy Research Center*, pp. 1–52, 2014.
- [27] UPME, "Expansion Plan Generation - Transmission 2016 – 2030," *National Energy Commission of Mining and Energy Planning Unit*, 2016.